

CHAPITRE 1

REMONTÉE DES FISSURES DANS LES RESURFACAGES

1.1 Introduction

Depuis de nombreuses années, d'importants travaux de recherche ont été menés dans le domaine du dimensionnement des chaussées. Diverses méthodes ont été établies, la plupart étant basées sur des essais accélérés et des observations effectuées sur routes expérimentales. Ces approches empiriques ont apporté de nombreux enseignements sur l'action des charges de trafic et des sollicitations thermiques, sur les propriétés des matériaux constitutifs de la chaussée ainsi que sur le comportement à long terme des structures routières (MTQ, 2004).

Le Québec est soumis à un climat rigoureux caractérisé par d'importants écarts de température (de 60 à 70°C). Même dans le sud de la province, il est fréquent que la température ambiante passe sous les -30°C au plus fort de l'hiver alors qu'elle atteint 30°C durant l'été (+ de 60°C dans l'enrobé) (Doré et coll., 1997).

Les chaussées, et de manière plus générale les structures de voirie, sont constituées de matériaux de nature et de propriétés très différentes. Toutes ces structures sous l'effet de causes très nombreuses deviennent faibles et sont susceptibles de se fissurer. Sous l'effet du trafic et de contraintes liées à l'environnement de la chaussée, ces diverses fissures se traduiront par des types de sollicitations très variables sur une nouvelle couche que l'on aura mise en place sur la structure fissurée : la couche de resurfacement (couche de roulement).

Des procédés ont été développés pour contrôler la remontée de fissure dans la couche de resurfaçage. Certains procédés, efficaces pour maîtriser la remontée de certaines fissures, ne le seront pas pour d'autres.

Un facteur déterminant dans le phénomène de remontée des fissures est la dégradation de la liaison entre la couche de base et la couche de resurfaçage. Cette liaison est réalisée par une couche très mince: l'interface. Selon les caractéristiques de l'interface, la fissure se propage plus ou moins vite dans la couche de resurfaçage.

1.2 Les causes de la fissuration des chaussées

La fissuration des chaussées souples est la forme de dégradation la plus importante au Québec (MTQ, 2002). Il existe plusieurs types de fissures qui ont des origines plus ou moins diverses. Dans cette section nous allons présenter très sommairement les caractéristiques des fissures des chaussées souples en les associant les différentes causes probables et le niveau de sévérité.

L'apparition de fissures à la surface d'une chaussée est toujours considérée par les responsables de la gestion et de l'entretien des routes comme un phénomène contre lequel il faut se prémunir, car elle aura des conséquences néfastes sur la bonne tenue de cette chaussée. Les conséquences défavorables des fissures de surface sont :

- perte d'étanchéité et risque de pénétration d'eau dans le corps de la chaussée et le sol support
- accroissement des contraintes, au droit de la fissure, sur le sol support et dans le corps de la chaussée, ce qui réduit la durée de vie de la structure
- dégradations de la couche de roulement au voisinage de la fissure sous l'effet du trafic, de l'eau, du gel, etc.

1.2.1 Type et forme des fissures

L'endommagement des chaussées s'accélère avec le temps, car l'apparition de petits défauts est à l'origine des zones encore plus faibles qui laisseront pénétrer l'eau, aggravant aussi le processus de dégradation. Les fissures sont le reflet de cette dégradation de la chaussée.

1.2.1.1 Type de fissures

Les fissures se manifestent lorsque les contraintes de traction engendrées dans un matériau sont supérieures à sa résistance. Globalement, on distingue quatre principaux types de fissures dans les chaussées souples : 1) fissures transversales, 2) fissures dans les traces de roues, 3) fissures hors traces de roues et 4) fissures de gel (Brodeur et coll., 2002).

Les fissures transversales se définissent comme une rupture qui se présente pratiquement perpendiculaires à l'axe longitudinal de la route et se localisent généralement sur toute la largeur de la chaussée (Figure 1a). Causes probables : retrait thermique; vieillissement et fragilisation du bitume; remontée de fissures après des travaux de resurfacement; joint de construction mal exécuté; arrêt et reprise des travaux de pose d'enrobé; diminution de la section du revêtement (ex. : vis-à-vis des regards ou des puisards).

Les fissures dans les traces de roues peuvent être définies comme une rupture du revêtement parallèlement à l'axe longitudinal de la route (Figure 1b) dans les traces de roues. Causes probables : fatigue du revêtement due au trafic lourd; capacité structurale insuffisante de la chaussée; mauvais drainage des couches granulaires de la chaussée (ex. : pendant le dégel).

Les fissures hors traces de roues (longitudinales) sont définies comme une rupture du revêtement suivant l'axe longitudinal de la route (Figure 1c). Causes probables : joint de construction mal exécuté le long de la travée adjacente; ségrégation de l'enrobé à la pose (ex. : centre de l'épandeur); vieillissement du revêtement.

Les fissures de gel (longitudinales) sont définies comme étant une rupture du revêtement créant une fissure active sous l'action du gel (Figure 1d). Causes probables : infrastructure gélive et soulèvements différentiels; comportement gélif différentiel (ex. : transition aux coupes de roc); remblai instable; drainage inadéquat.

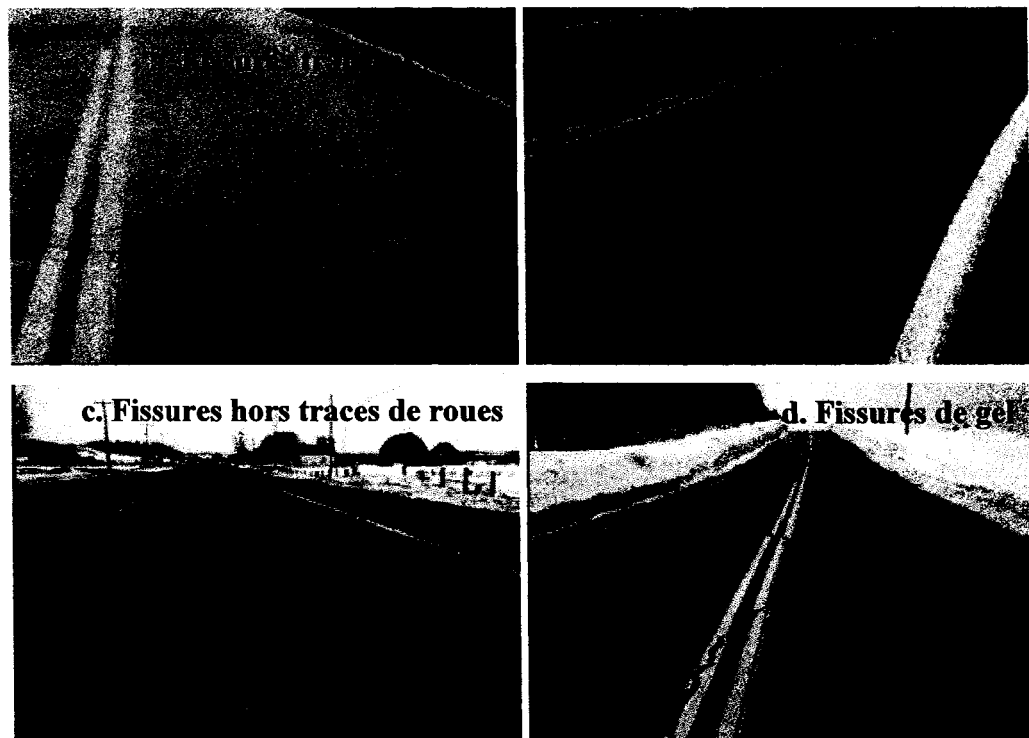


Figure 1 Fissures dans les chaussées (Brodeur et coll., 2002)

Le Tableau I présente un protocole d'identification de la fissuration pour chaussée souple tel que proposé par le MTQ :

Tableau I

Protocole d'identification de la fissuration pour chaussée souple (MTQ, 2002)

Type (cause)	Description	Sévérité (ouverture)	Étendue (longueur)
Fissure transversale (retrait thermique)	Fissure transversale présente sur toute la largeur de la voie	<i>Faible</i> : Fissure simple avec ouverture <5mm <i>Moyenne</i> : Fissure simple avec ouverture ≥ 5 et ≤ 20 mm Fissure multiple avec ouverture ≤ 20 mm <i>Majeure</i> : Fissure simple ou multiple avec ouverture >20mm et fissure en carrelage	Nombre de fissures tous les 10m, par niveau de sévérité
Fissure longitudinale (fatigue)	Fissure située dans les pistes de roues (bandes 2 et 4)	<i>Faible</i> : Fissure simple avec ouverture <5mm <i>Moyenne</i> : Fissure simple avec ouverture ≥ 5 et ≤ 20 mm Fissure multiple avec ouverture ≤ 20 mm <i>Majeure</i> : Fissure simple ou multiple avec ouverture >20mm et fissure en carrelage	Longueur de chaussée affectée tous les 10m, par niveau de sévérité
Lézarde (gel)	Fissure erratique qui suit un tracé irrégulier, sans patron défini	<i>Faible</i> : Fissure lézarde avec ouverture <5mm <i>Moyenne</i> : Fissure lézarde avec ouverture ≥ 10 et ≤ 25 mm <i>Majeure</i> : Fissure lézarde avec ouverture >25mm	Longueur de chaussée affectée tous les 10m, par niveau de sévérité
Autres	Autres types de fissures n'appartenant pas aux catégories indiquées ci-dessus (bandes 1,3et 5)	<i>Faible</i> : Fissure simple avec ouverture <5mm <i>Moyenne</i> : Fissure simple avec ouverture ≥ 5 et ≤ 20 mm Fissure multiple avec ouverture ≤ 20 mm <i>Majeure</i> : Fissure simple ou multiple avec ouverture >20mm et fissure en carrelage	Longueur de chaussée affectée tous les 10m, par niveau de sévérité

1.2.1.2 Formes et configurations des fissures

Selon leur origine, le type de structure qu'elles concernent et l'avancement du processus qui les a créées, les fissures prennent différentes formes et différentes configurations (Yoder et Witczak, 1975).

Orientation - les fissures sont le plus souvent longitudinales (parallèles au sens de circulation des véhicules) ou transversales (perpendiculaires au sens de la circulation). Les fissures sont plus rarement obliques ou paraboliques.

Forme - souvent relativement rectilignes, les fissures peuvent cependant être tortueuses, voire courbes.

Aspect - Les fissures peuvent être franches si leur tracé est net et unique; elles peuvent être aussi dédoublées, ramifiées, voire faïencées (Figure 2).

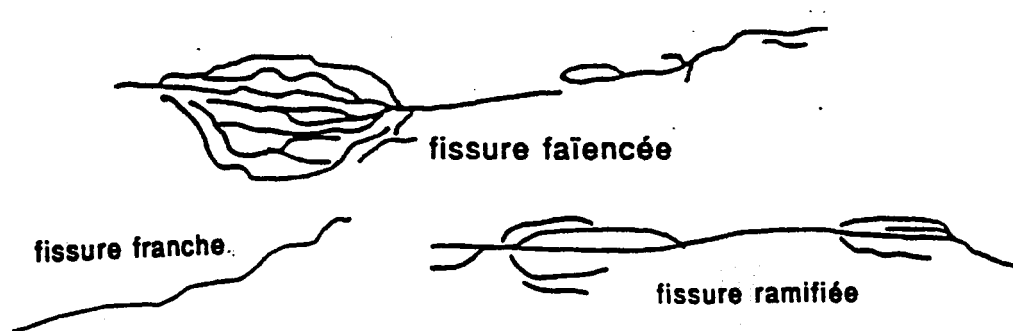


Figure 2 Différents aspects des fissures (DRCR, 1979)

Ouverture - selon les cas, l'ouverture des fissures (espacement entre les 2 bords de la fissure) peut être très différente.

Au Québec, le niveau d'ouverture peut-être (MTQ, 2002):

- Faible : fissures simples et irrégulières dont les ouvertures sont inférieures à 5mm
- Moyen : fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de 5 à 20 mm
- Majeur : fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de plus de 20 mm

Configuration - les fissures peuvent être séparées et indépendantes, ou au contraire, être intégrées dans un réseau plus ou moins dense, maillage ou faïençage. (Figure 3)

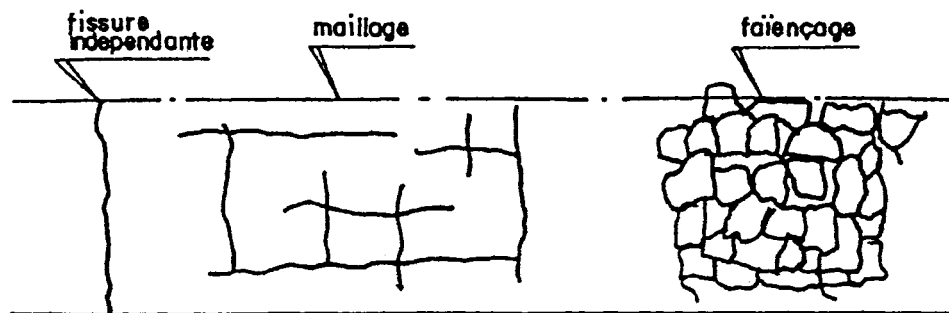


Figure 3 Différentes configurations des fissures (DRCR, 1979)

1.2.2 L'origine des fissures dans les chaussées

Les couches de roulements sont plus ou moins sensibles à la fissuration. D'une manière générale, l'origine des fissures peut être un défaut de construction, la fatigue liée au trafic, le retrait thermique empêché et ainsi un mouvement du sol.

1.2.2.1 Défauts de construction

Certaines erreurs de conception de la chaussée ou une mauvaise exécution d'une ou plusieurs couches sont à l'origine de fissures apparaissant dans la structure:

Variation de portance transversale: le phénomène est fréquent lorsqu'une route ancienne est élargie. Au droit de l'élargissement se crée très souvent une fissure longitudinale, notamment lorsque la limite de l'élargissement se situe entre le passage des roues des véhicules.

Joints de mise en œuvre: les raccords longitudinaux entre bandes, ou transversaux aux reprises de répandage créent des zones faibles lorsqu'ils sont mal réalisés et que la continuité n'est pas assurée dans la couche mise en oeuvre. Ces défauts sont très souvent la cause de fissures et ils concernent aussi bien les matériaux hydrauliques que les matériaux bitumineux.

Décollement entre couches: lorsque la liaison entre la couche de roulement et l'assise de la chaussée n'est pas assurée, la couche de roulement peut se fissurer rapidement sous l'effet du trafic.

1.2.2.2 Fatigue sous l'effet du trafic

Chaque couche de chaussée est assimilée à une poutre en flexion sous l'effet du trafic (Figure 4). Le calcul des efforts et déformations qui apparaissent nécessite la connaissance du module de Young et aussi du coefficient de Poisson (Dumont et Di Benedetto, 1998).

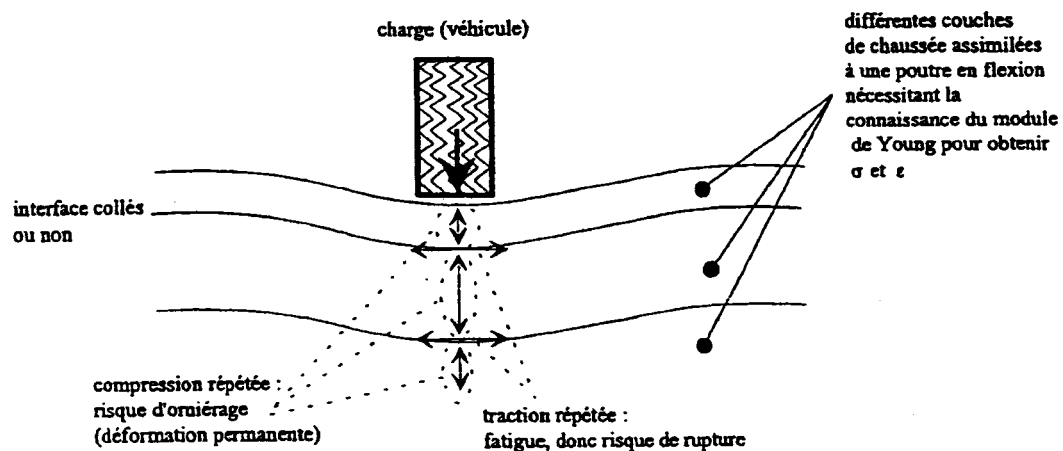


Figure 4 Schématisation des sollicitations induites par la fatigue (Dumont et Di Benedetto, 1998)

Les tractions répétées à la base des couches sous l'effet du passage des véhicules créent des "micro" dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Ce phénomène est la fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Une fissure peut également apparaître et se propager dans la chaussée.

La fatigue, due à un trafic cumulé trop importante supporté par la chaussée (pour son dimensionnement ou ses caractéristiques) se traduit ultimement par l'apparition de fissures en surface. Cette fatigue excessive peut concerner l'ensemble de la structure (couche de base et de fondation et couche de roulement) ou la seule couche de roulement.

Les fissures de fatigue apparaissent généralement dans le sens longitudinal, au niveau des voies de circulation dans les traces de roues.

Les fissures de fatigue sont la conséquence d'une insuffisance structurelle de la chaussée. Elles précèdent la période de destruction totale de la chaussée. Elles sont provoquées, pour des structures à assises traitées, par des contraintes de traction par flexion excessive dans les assises. Pour les chaussées souples, elles sont la conséquence d'un excès de déflexion structurale qui engendre des contraintes de traction excessives à la base de la couche de roulement (STBA, 1999).

1.2.2.3 Retrait thermique empêché

Le retrait thermique empêché dû à la baisse de température journalière ou saisonnière est à l'origine de fissures transversales dites de retrait.

Le retrait thermique empêché d'une couche de chaussée de longueur quasi infinie se traduit par des fissures chaque fois que le frottement de la couche sur son support est

suffisant pour que se créent, dans cette couche, des contraintes qui deviennent supérieures à sa résistance en traction (Colombier, 1989).

En général, les fissures de retrait thermique empêché concernent essentiellement les climats très froids comme au Québec. Cependant, d'autres causes probables telles que le vieillissement et la fragilisation du bitume, la remontée de fissures après des travaux de resurfaçage, des joints de construction mal exécutés (arrêt et reprises des travaux de pose d'enrobé) et la diminution de la section de revêtement peuvent être à l'origine des fissures transversales importantes (Brodeur et coll., 2002)

1.2.2.4 Mouvements du sol

Des mouvements ou une perte de portance locale du sol sur lequel repose la structure peuvent aussi être la cause de fissures qui se propagent dans les diverses couches de la chaussée. À l'origine de ces types de fissuration, on peut rencontrer des phénomènes très variés (Colombier, 1989):

- perte de portance par augmentation de la teneur en eau d'un sol sensible mal drainé
- tassement lent sous l'effet du trafic et du poids de la chaussée d'un sol compressible ou d'un remblai mal compacté
- glissement de terrain, notamment pour les routes en profil mixte déblai-remblai
- retrait hydrique d'un sol argileux par perte d'eau excessive à la suite d'une période très sèche. Ce phénomène fréquent est souvent accentué par la présence d'arbres en bord de routes qui mobilisent une partie de l'eau du sol
- gonflement du sol au gel lorsque la protection thermique apportée par les couches de chaussées est insuffisante pour éviter que le gel atteigne un sol sensible.

1.2.2.5 Synthèse de l'origine des fissures dans les chaussées souples

Le Tableau II présente une synthèse des éléments mis en relief par la revue de la littérature quant à l'origine des fissures dans les chaussées souples.

Tableau II

Origine des fissures dans les chaussées souples

ORIGINE	CARACTERISTIQUES
Défauts de constructions	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mise en place
Fatigue	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Effet cumulé du trafic
Retraits	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Retrait liant hydraulique <ul style="list-style-type: none"> - retrait d'hydratation - retrait d'auto dessiccation et de dessiccation ▪ Retrait thermique ($\Delta\varepsilon_T$) <ul style="list-style-type: none"> - effet de bloc (mouvement gêné par le substrat)
Mouvement de sol	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mauvais drainage <ul style="list-style-type: none"> - sol sensible: $w \uparrow$ ▪ Tassement lent sous charge <ul style="list-style-type: none"> - compressibilité et mauvaise compaction ▪ Glissement de terrain ▪ Retrait hydrique <ul style="list-style-type: none"> - sol argileux... perte d'eau ▪ Gonflement du sol <ul style="list-style-type: none"> - Gel – dégel dans des matériaux sensibles... perte d'eau

1.2.3 Les actions de resurfaçage

L'entretien et la gestion d'un réseau routier nécessitent différents types de traitements afin d'améliorer les caractéristiques de sécurité et de confort des usagers. Dépendamment de l'état de la chaussée, ces traitements peuvent aller des simples

actions de maintenance à la reconstruction complète de la structure de chaussée (Huang, 2004).

Pour les chaussées en cycle d'entretien normal, le resurfaçage permet de rehausser les caractéristiques de confort et de sécurité. Selon le matériau de resurfaçage et le genre de chaussée, il existe quatre cas possibles de resurfaçage : une chaussée souple à resurfacier avec du béton bitumineux, une chaussée souple à resurfacier avec du béton de ciment (White topping), une chaussée rigide à resurfacier avec du béton bitumineux et une chaussée rigide à resurfacier avec du béton de ciment. C'est essentiellement le cas du resurfaçage d'une chaussée souple avec du béton bitumineux qui nous intéresse dans le cadre de ce mémoire.

Le resurfaçage des chaussées souples avec du béton bitumineux demeure le type de resurfaçage le plus répandu. Deux éléments sont considérés pour cibler un système et une épaisseur appropriée de resurfaçage : 1) les considérations d'ordre structural (fatigue) et 2) les considérations de durabilité (remontée de fissures). La revue de la littérature a donc été faite dans la perspective de mettre en relief l'ensemble des éléments pertinents relatifs à ces considérations.

1.2.3.1 Calcul de l'épaisseur d'un resurfaçage d'une chaussée souple suivant les considérations structurales

Les techniques de dimensionnement des resurfaçages sont très diverses. En général, elles sont identiques à celles des nouvelles chaussées, à quelques considérations près quant à certains paramètres de dimensionnement dont, notamment, la durée de vie ciblée.

Il existe trois méthodes de dimensionnement des resurfaçages : la méthode de l'Asphalt Institute (AI), la méthode de l'association du ciment Portland (PCA) et la méthode de l'AASHTO. Ces trois méthodes de dimensionnement des resurfaçages sont basées sur

les trois concepts de base du design des resurfaçages : une méthode de l'épaisseur effective, une méthode de la déflexion et une méthode dite empirique – mécanistique.

L'approche de l'épaisseur effective - L'approche de l'épaisseur effective est basée sur le fait que l'épaisseur de resurfaçage (Overlay : h_{OL}) est la différence de l'épaisseur résiduelle ($h_{résid.}$) de la chaussée à celle correspondant d'une nouvelle chaussée (h_{nc}).
Soit :

$$h_{OL} = h_{nc} - h_{résid.} \quad (1.1)$$

L'approche de la déflexion - L'approche par déflexion est basée sur le fait qu'une déflexion résiduelle d'une chaussée doit être faible, en deçà d'une déflexion admissible, laquelle limite le risque d'une fatigue excessive des couches bitumineuses. Si la chaussée présente une grande déflexion résiduelle, le resurfaçage devra être le plus épais pour réduire cette déflexion. L'épaisseur de resurfaçage est donc définie par une relation empirique entre la déflexion des chaussées et l'épaisseur de resurfaçage.

L'approche empirique-mécanistique - L'approche empirique-mécanistique est basée sur la détermination de certains paramètres critiques notamment les contraintes, les efforts et les déflexions par des méthodes mécanistiques et coupler à des modèles d'endommagements établis sur des bases empiriques.

1.2.3.2 La technique de l'Asphalt Institute (AI)

La méthode de l'Asphalt Institute (Shook et coll., 1982), basée sur l'approche de déflexion, est simple à utiliser dans la mesure où elle permet de faire un lien entre les épaisseurs de resurfaçage, la durée de vie et les déflexions résiduelles sur route.

La technique de conception des resurfaçages de l'Asphalt Institute permet de calculer l'épaisseur de resurfaçage pour tout type de chaussées avec du béton bitumineux. La

conception du resurfaçage peut se faire selon deux méthodes de base : la méthode de l'épaisseur effective et la méthode de déflexion.

La déflexion de la chaussée est mesurée par l'essai de la masse tombante (FWD). Les essais ont lieu sur la route dans différentes conditions et les données recueillies sont traitées et regroupées en sections homogènes d'un tronçon de la chaussée analysée.

1.2.3.1.1 Calcul de la déflexion représentative

Le calcul de la déflexion représentative d'une section donnée, δ_{rd} , est définie comme suit :

$$\delta_{rd} = (\bar{\delta} + 2s)F \times c \quad (1.2)$$

1.2.3.1.2 Calcul de l'épaisseur du resurfaçage à mettre en œuvre

L'approche proposée par l'AI pour calculer l'épaisseur de resurfaçage à mettre en œuvre est simple. Elle se fonde sur deux hypothèses : 1) la chaussée est considérée comme un milieu continu, semi-infini, élastique et homogène et 2) il existe une relation unique entre la déflexion mesurée en surface (δ_d) et la durée de vie du resurfaçage.

Milieu continu, semi-infini, élastique et homogène : Cette hypothèse simplificatrice nous permet de considérer que le système de resurfaçage est réduit à un système bicouche. La chaussée fissurée à resurfacier (le substrat) d'épaisseur infinie, présente un module élastique E_{Sub} , alors que le resurfaçage est défini par une épaisseur h_{OL} et constituée d'un matériau élastique de module E_{OL} . La Figure 5 présente schématiquement l'action d'un pneumatique suivant cette configuration sur la structure de la chaussée bicouche.

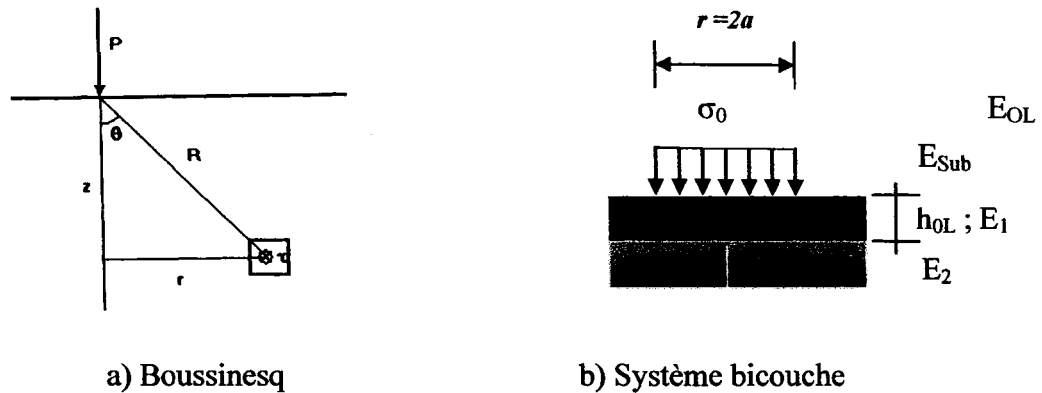


Figure 5 Structure de chaussée bicouche

En appliquant l'approche développée par Boussinesq (Figure 5a) et en considérant la déflexion représentative d'un tronçon donné avant resurfacement δ_{rrd} , on détermine dans un premier temps le module élastique du substrat (E_{Sub}) présumé un milieu continu, semi-infini, homogène et élastique, à resurfacer :

$$d_{z=0} = \frac{(1+\nu)\sigma_0 r}{E_{sub}} [1+(1-2\nu)] \quad (1.3)$$

En posant $\nu = 0,5$ et $r = 2a$ on a :

$$E_{sub} = \frac{1,5\sigma_0 a}{d_{z=0}} \quad (1.4)$$

En surface on a $d_{z=0} = \delta_{rrd}$ et $\sigma_0 = q$, soit :

$$E_{sub} = \frac{1,5q a}{\delta_{rrd}} \quad (1.5)$$

Avec : q = pression de contact du pneu
 a = rayon de contact d'un essieu simple

Lorsqu'on considère le système bicouche, la relation entre la déflexion et les caractéristiques des couches est donnée par la relation suivante :

$$\delta_d = \frac{1,5 q \cdot a}{E_{sub}} \left(\left\{ 1 - \left[1 + 0,8 \left(\frac{h_{OL}}{a} \right)^2 \right]^{-0,5} \right\} \frac{E_{sub}}{E_{OL}} + \left\{ 1 + \left[0,8 \frac{h_{OL}}{a} \left(\frac{E_{OL}}{E_{sub}} \right)^{1/3} \right]^2 \right\}^{-0,5} \right) \quad (1.6)$$

L'Équation 1.6 permet de mettre en relation la déflexion mesurée en surface, δ_d , aux caractéristiques du resurfaçage (E_{OL} et h_{OL}).

1.2.3.1.3 Relation entre la déflexion admissible et la durée de vie escomptée

Comme nous l'avons évoqué précédemment, un des modes importants de la dégradation des chaussées souples est lié à la fatigue de l'enrobé à la base de la couverture bitumineuse. Il est admis que la relation log-log entre la durée de vie en fatigue et l'amplitude de la sollicitation est bien représentée par la loi de Wöhler pour laquelle cette relation est admise comme étant linéaire. Or, lorsqu'on fixe la profondeur z , on constate que la déflexion en surface et la déformation radiale sont toutes deux directement proportionnelles à l'intensité de la contrainte appliquée et inversement proportionnelles à la rigidité du milieu. Bien que la relation présentée à la Figure 6 ne saurait être universelle, elle reflète une situation réaliste quant à la durée de vie fondée sur l'amplitude de la déflexion. Selon l'Asphalt Institute, cette relation permet d'estimer une déflexion admissible en fonction de l'ECAS.

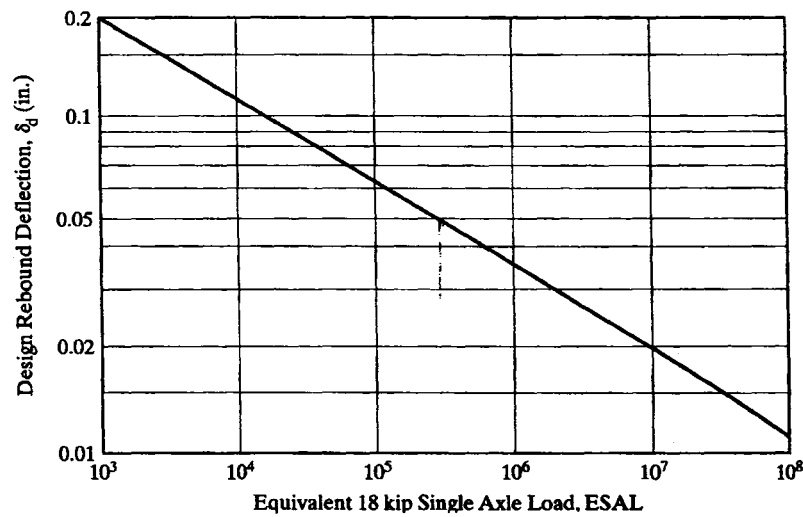


Figure 6 Relation entre la déflexion et l'ECAS (Asphalt Institute, 1983)

1.2.4 La remontée des fissures dans un resurfaçage

Pour bien comprendre les aspects à considérer afin de cibler un système de resurfaçage et des épaisseurs appropriées, il convient dans un premier temps de définir la notion de système de resurfaçage et, dans un deuxième temps, de présenter un bilan de la littérature quant aux réflexions qui ont été menées vis-à-vis des causes, des modes et des processus qui sont à l'origine de la remontée des fissures dans un resurfaçage.

Notion de système de resurfaçage

Ces systèmes désignés «systèmes anti-remontés des fissures» sont intercalés généralement entre le resurfaçage et le substrat fissuré. La Figure 7 illustre un modèle type qui définit le mode de fonctionnement des systèmes de resurfaçage.

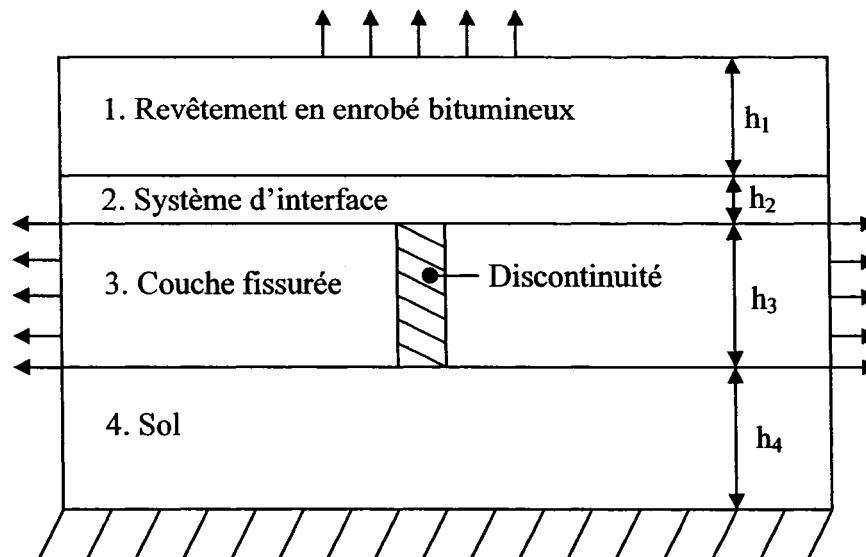


Figure 7 Modèle type de pose de systèmes anti-fissures (Rigo et coll., 1993)

La remontée d'une fissure dans une couche de resurfacement est liée au fait que, sous l'effet de sollicitations diverses, les lèvres de la fissure du substrat ont des mouvements qui se transmettent à la base de la couche de resurfacement où il se crée une concentration de contraintes. Étudier le problème de la remontée des fissures nécessite donc de définir d'une part les modes de propagation d'une fissure et, d'autre part, les sollicitations susceptibles d'engendrer les mouvements des bords des fissures existantes et d'analyser la nature des mouvements ainsi créés (Colombier, 1989).

1.2.4.1 Les modes de propagation d'une fissure

Pour la propagation d'une fissure au sein d'un milieu continu homogène, élastique et isotrope, on définit trois différents modes tels qu'illustrés à la Figure 8.

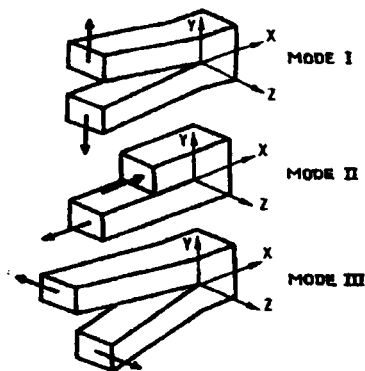


Figure 8 Les trois différents modes de propagation d'une fissure au sein d'un milieu continu (Al-Qadi, et coll, 2003; Scarpas & de Bondt, 1996; Rigo et coll., 1993; Parcels et coll., 1982)

Les mouvements à l'origine de la remontée des fissures dans une couche de resurfaçage sont différents selon le type de chaussée en cause, la nature et la forme de la fissure existante et le type de sollicitations auxquelles sont soumis les bords de la fissure. Suivant ces considérations, on admet par analogie aux différents modes de propagation d'une fissure au sein d'un milieu continu, que trois types de mouvements possibles des bords d'une fissure d'une chaussée souple pourront être à l'origine de sa remontée en surface de la couche de resurfaçage, soit (Al-Qadi, et coll, 2003; Scarpas & de Bondt, 1996; Rigo et coll., 1993; Parcels et coll., 1982):

- Le mode I qui correspond à un mouvement d'ouverture/fermeture de la fissure : écartement des lèvres de la fissure
- Le mode II qui correspond à un cisaillement
- Le mode III qui correspond à un déchirement.

Des exemples de ces types de mouvements entraînant la remontée de la fissure dans la couche supérieure sont représentés à la Figure 9 :

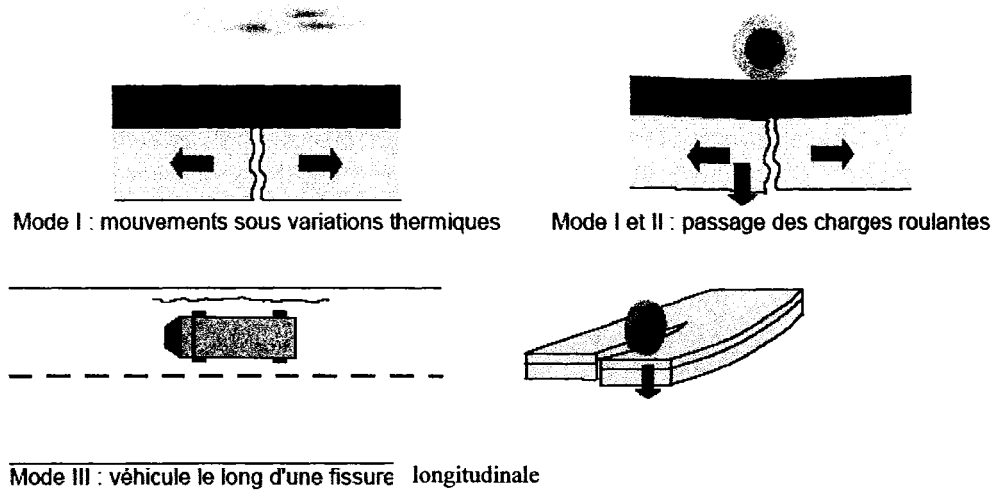


Figure 9 Mouvements possibles des lèvres d'une fissure (Laveissière, 2002)

1.2.4.2 Sollicitation susceptible d'engendrer la remontée d'une fissure

La remontée d'une fissure dans un resurfaçage est liée à l'effet des sollicitations diverses : le trafic, les effets thermiques et hydriques (Haddar et coll., 2005; Harvey et Bejarano, 2001; Liang et Zhou, 1997; Brown et Brunton, 1989). Ces sollicitations génèrent des contraintes dans le resurfaçage au droit des fissures existantes.

1.2.4.2.1 Trafic

D'une manière générale, le trafic crée des mouvements verticaux et horizontaux aux bords de la fissure. En effet, lorsqu'un véhicule s'approche d'une fissure transversale, il se crée à la fois un enfoncement d'un bord par rapport à un autre (mode II), et un éloignement des deux lèvres de la fissure (mode I). Quand le véhicule est à l'aplomb de la fissure, il y a uniquement ouverture des lèvres, c'est-à-dire éloignement des deux lèvres (mode I) (Colombier, 1989).

Les mouvements des lèvres d'une fissure transversale, dus au trafic sont rapides (de l'ordre du $1/10^{\text{e}}$ de seconde), fréquents (de quelques centaines à quelques milliers de cycles par jour) et d'amplitude variable (fonction de la charge de l'essieu, de la déformabilité de la structure et de l'engrènement de la fissure) (Colombier, 1989).

1.2.4.2.2 Les variations de température

Outre le vieillissement du matériau, la température a deux effets mécaniques principaux (Di Benedetto et coll., 2005) :

- 1) Changement de la rigidité (module) du matériau. Un béton bitumineux que l'on chauffe devient plus mou, et
- 2) Création de contraintes au sein du matériau en raison des dilatations-contractions thermiques lors des changements de température (Figure 10).

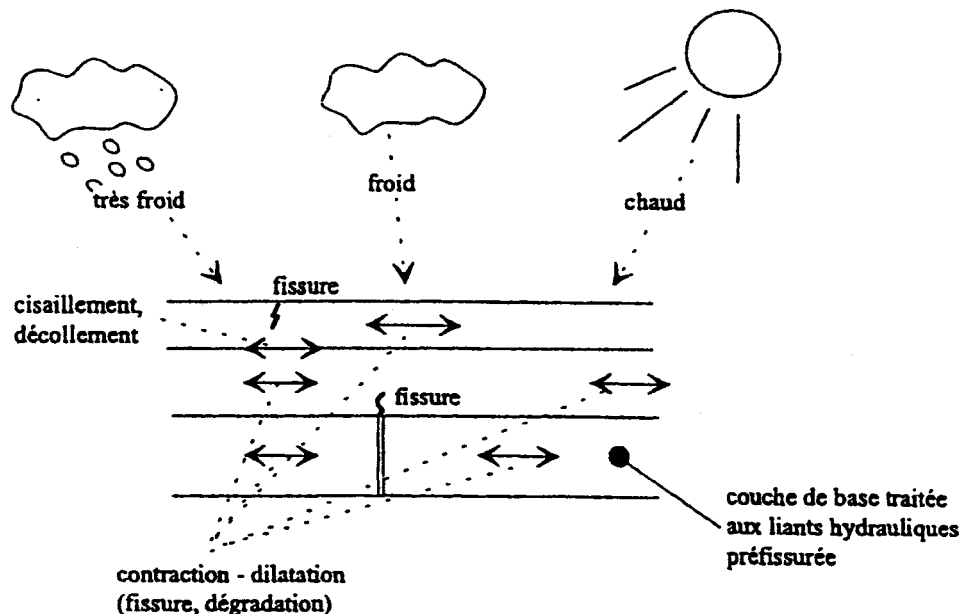


Figure 10 Schématisation des sollicitations induites par la température (Dumont et Di Benedetto, 1998)

Les variations de température Jour-Nuit ou Été-Hiver créent des allongements et des retraits des parties de chaussées comprises entre 2 fissures. Le plus souvent ces

phénomènes se traduiront par l'ouverture ou par la fermeture de la fissure. Dans certains cas, l'existence d'un gradient thermique important dans la couche fissurée pourra conduire à une cambrure de cette dernière. Les variations inverses (nuit - jour, hiver - été) créent des allongements de l'assise entre deux fissures entraînant la fermeture des lèvres (Colombier, 1991).

Les mouvements des lèvres liés à la température, sont lents (jour - nuit), ou très lents (été - hiver), peu fréquents (de deux fois par jour à quelques fois par an) et d'amplitude variable (fonction de la variation de température, de la nature des granulats, de l'espacement entre fissures et de la qualité de l'interface) (Colombier, 1988; Parcells et coll., 1982).

1.2.4.2.3 Les mouvements de la fondation et/ou du sol d'infrastructure

Comme nous avons vu, il y a deux types de variations qui créent les mouvements de la fondation et/ou du sol d'infrastructure : la variation hydrique du sol et l'effet de cycles de gel-dégel.

Variation hydrique - Qu'elles aient été ou non à l'origine de la fissure, les variations hydriques du sol sont susceptibles de créer des mouvements d'ouverture ou de fermeture de cette dernière (mode I) (Colombier, 1988).

Sous l'effet du froid, la pénétration du gel s'effectue graduellement dans les sols en partant du haut de la fissure vers le bas (Figure 11). Ce gel endommage la structure. Dans certaines conditions défavorables, l'eau contenue dans les sols non gelés peut être aspirée vers la zone de gel. Ce pompage de l'eau de la nappe phréatique engendre alors la formation de lentilles de glace qui se traduit par un soulèvement de la chaussée et force aussi l'ouverture ou fermeture de la fissure.

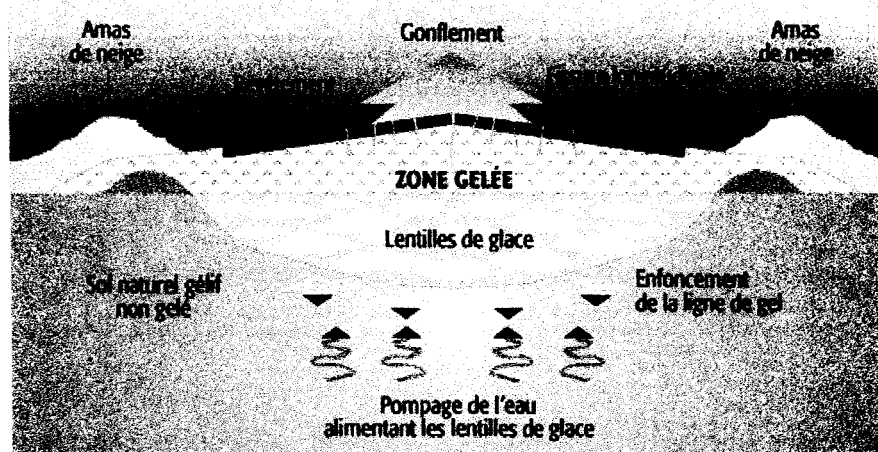


Figure 11 Effet du gel et du dégel sur une route : Gonflement au gel (MTQ, 2002)

Effet des cycles de gel-dégel - La chaussée n'est pas au bout de ses affaissements, car arrive ensuite le dégel printanier qui se fait aussi du haut vers le bas. L'eau provenant de la fonte de la neige en surface et de la fonte des lentilles de glace à l'intérieur, se retrouve en quantité importante dans la couche de sol dégelé. Cette eau est alors emprisonnée dans le sol à cause de la couche gelée du dessous qui est étanche (Figure 12) et la chaussée présente une perte de capacité portante de par une saturation en eau, (perte de perméabilité)

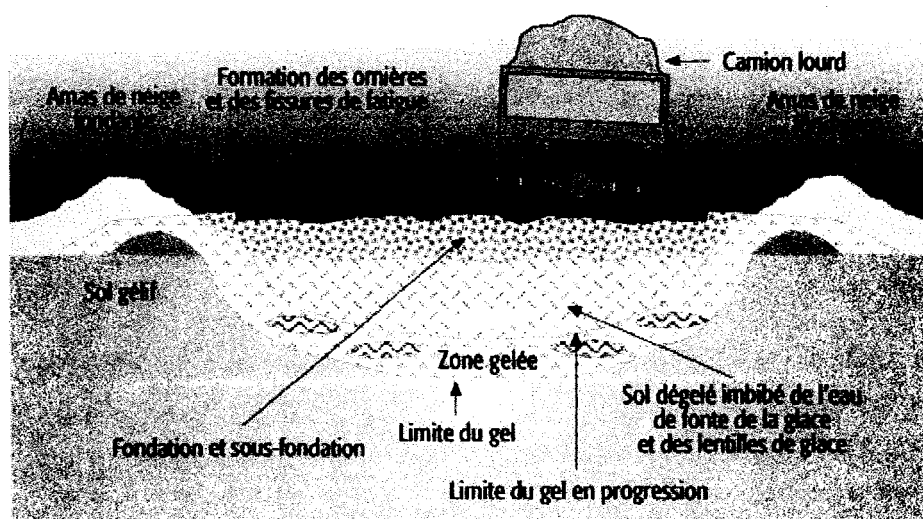


Figure 12 Effet du gel et du dégel sur une route : Affaissement au dégel (MTQ, 2002)

1.2.4.3 Vitesse du mouvement

Compte tenu des différents types de sollicitations possibles, les mouvements des bords de fissures peuvent être, sous l'angle de la vitesse, classés en 3 grandes catégories:

- les mouvements rapides sont liés au trafic et plus particulièrement au trafic poids lourds. En moyenne, on peut estimer que la durée du mouvement est de l'ordre du dixième de seconde
- les mouvements lents sont liés aux variations de température journalières (entre le jour et la nuit) et au retrait qu'elles entraînent
- les mouvements très lents se produisent entre deux saisons (été et hiver) pour le retrait thermique, (saison sèche – saison pluvieuse) pour les retraits hydriques.

1.2.4.4 Amplitude des mouvements

L'amplitude des mouvements des bords des fissures dépendra de l'intensité du phénomène et de la capacité de la structure intercepter les sollicitations (trafic : fonction de la charge par essieu des véhicules qui circulent sur la chaussée, et thermique : une fonction directe de l'écart de température créant ce retrait, mais aussi du coefficient de dilatation des matériaux en cause).

1.2.4.5 Fréquence des mouvements

On retrouve pour le paramètre associé à la fréquence des mouvements, la même classification que pour la vitesse:

- les mouvements dus au trafic sont rapides et se produisent à une fréquence élevée qui correspond approximativement aux nombres de véhicules lourds circulant sur la chaussée (quelques centaines à quelques milliers par jour)
- les mouvements liés aux variations de température jour-nuit se produisent en général 2 fois par jour

- les mouvements liés aux variations de température ou aux retraits hydriques, saisonniers se produisent que, quelquefois par année.

1.2.4.6 Synthèse des causes à l'origine de la remontée des fissures dans les resurfaçages

Les phénomènes de retrait thermique et/ou hydrique engendrent systématiquement des mouvements des bords de fissure de mode I (ouverture-fermeture). Le trafic suivant la position du véhicule par rapport à la fissure et selon la géométrie de celle-ci va créer des mouvements de mode I, II ou III. En effet, un véhicule approchant une fissure transversale va créer le plus souvent des mouvements de mode II. Lorsque l'essieu sera à l'aplomb de la fissure, le mouvement des bords de la fissure sera essentiellement de mode I (ouverture-fermeture). Par ailleurs, un véhicule circulant à cheval sur une fissure longitudinale va engendrer des mouvements des bords de la fissure de mode III.

Le Tableau III présente une synthèse des éléments mis en relief par la revue de la littérature, quant aux types de sollicitations qui peuvent provoquer la remontée des fissures dans les chaussées souples.

Tableau III

Type de sollicitation pouvant provoquer la remontée des fissures

Type de sollicitation	Détails
Trafic	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Passage des véhicules <ul style="list-style-type: none"> - mouvement concentré à la fissure $\Rightarrow \Delta x$ et Δy - sollicitation de TRACTION par flexion \Rightarrow fatigue de l'enrobé
Gradient de température (ΔT)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Saisonnière</u> <ul style="list-style-type: none"> - peu de cycles (+/-80 cycles) comparativement à la fatigue en flexion - déformation de grandes amplitudes selon x: Δx important ▪ <u>Journalière</u> <ul style="list-style-type: none"> - toujours une déformation en x, mais amplitudes moyennes - beaucoup de cycles
Mouvement de sol	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gradients hydriques dans le sol ▪ Mouvement de sol lié aux cycles de gel – dégel (infrastructure sensible; drainage critique)

1.2.5 Le processus de propagation d'une fissure

1.2.5.1 La propagation

Le développement d'une fissure existante dans une couche de resurfacement sous l'effet de sollicitations diverses se déroule, en général, en 3 étapes mettant en jeu des mécanismes différents (Bonnot, 1989).

La phase d'initialisation correspond à la création de l'amorce de la fissure à partir de défauts préexistants dans la couche non fissurée.

La phase de propagation lente de la fissure correspond à sa remontée dans l'épaisseur de la couche à partir de l'amorce d'entaille où se sont concentrées les contraintes dues aux sollicitations du trafic ou thermiques.

La phase de rupture ou finale correspond à l'apparition de la fissure à la surface de la couche de resurfaçage.

1.2.5.2 Cheminement de la fissure

La propagation d'une fissure dans la couche de resurfaçage d'une structure dont la couche de base est fissurée découle soit (Lefort, Sicard, & Merrien, 1999) :

- du décollement de l'interface (propagation horizontale)
- de la propagation verticale en prolongement de la fissure existante
- des deux phénomènes couplés, cités ci-dessus.

La propagation d'une fissure est régie par le rapport entre l'effort tendant à propager la fissure dans une direction donnée et la résistance qu'opposent les matériaux à cette propagation dans cette direction. La Figure 13 résume les différentes possibilités de cheminement d'une fissure dans un resurfaçage :

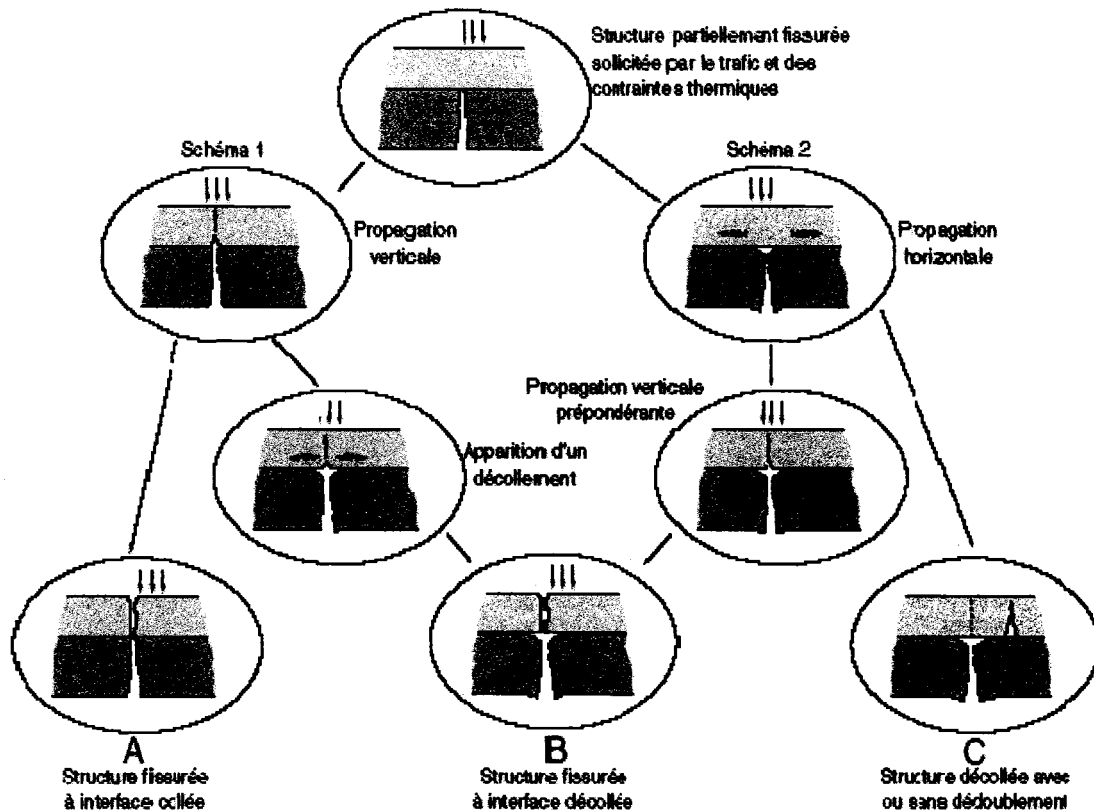


Figure 13 Cheminement d'une fissure (Goacolou, 1982, et Lefort, 1999)

Le schéma 1 est le résultat d'une très bonne liaison entre la couche de roulement et la couche de base. La fissure progresse verticalement dans la couche supérieure. Lors de cette propagation, s'il n'y a pas fatigue de l'interface, la fissure débouche en surface en conservant l'interface collée (schéma A). Si au contraire l'interface fatigue, il y a décollément de part et d'autre de la fissure simultanément à la remontée de la fissure en surface (schéma B) (Lefort et al., 1999)

Le deuxième schéma de propagation de la fissure présente une interface à liaisons faibles, ce qui entraîne dans un premier temps une propagation essentiellement horizontale. Cette propagation se stabilise et le processus se poursuit par une amorce dans la couche de roulement soit au droit de la fissure d'assise (schéma B), soit à

l'extrémité du décollement ou aux deux endroits à la fois (schéma C) (Lefort et al., 1999).

Sous l'action conjuguée du trafic et des sollicitations de retrait (thermique et/ou hydrique), la fissure peut se développer soit directement vers la surface, les couches restant collées, soit au niveau de l'interface. Il y a alors décollement des couches et un processus de fatigue de la couche de resurfaçage sous l'effet du trafic au cours duquel prend naissance une nouvelle phase de propagation verticale. Un tel scénario conduit à une structure fissurée avec destruction des liaisons à l'interface (Colombier, 1989; Lefort et coll., 1999).

1.3 Maîtrise de la remontée des fissures dans les chaussées

Contrôler ou maîtriser la remontée des fissures des chaussées, c'est vouloir limiter ou supprimer les conséquences défavorables auxquelles conduit l'apparition en surface de ces fissures (Colombier, 1989). Pour ce faire, beaucoup de techniques ont été proposées. L'ensemble de ces techniques peut se résumer en 3 types de solutions (Colombier, 1989) soient :

- 1) supprimer la cause des fissures,
- 2) empêcher ou retarder la remontée des fissures dans le resurfaçage,
- 3) modifier les caractéristiques de la couche de resurfaçage par "renforts" des additifs de structures.

Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes uniquement intéressés à la deuxième solution, qui consiste à empêcher ou retarder la remontée des fissures dans la couche de resurfaçage par utilisation d'un complexe anti-remontée des fissures.

1.3.1 Empêcher ou ralentir la remontée des fissures dans la couche de surface

Pour empêcher ou retarder la remontée des fissures dans un resurfaçage, quatre types de solutions sont possibles : 1) augmentation de l'épaisseur de la couche de resurfaçage, 2) optimisation des propriétés de l'enrobé en couche de resurfaçage, 3) interposition d'un produit ou d'un complexe entre la couche fissurée (substrat) et le resurfaçage et 4) utiliser un renfort au sein du resurfaçage (Colombier, 1988).

1.3.1.1 Augmentation de l'épaisseur de la couche de resurfaçage

Augmenter l'épaisseur de la couche de resurfaçage que l'on met en place sur une structure fissurée constitue une solution efficace pour retarder l'apparition en surface des fissures. En effet, l'augmentation de l'épaisseur de la couche de resurfaçage : 1) modifie l'état de contrainte au droit des fissures existantes créées par le trafic (phase d'initialisation) ; 2) réduit les écarts de température entre la couche fissurée et le resurfaçage diminuant ainsi l'amplitude des mouvements des bords des fissures (phase d'initialisation) et, 3) augmente directement la longueur du trajet que devra suivre la fissure initialisée pour atteindre la surface (phase de propagation) (Colombier, 1988).

Selon Colombier (1988), augmenter l'épaisseur du resurfaçage de 3 à 8 cm conduit à doubler le temps d'apparition en surface de l'ensemble des fissures existantes. La solution est efficace, mais elle ne permet pas de garantir l'absence totale à terme de fissures en surface, sauf si l'épaisseur du resurfaçage est d'au moins à 20 cm, mais cette solution est très coûteuse.

1.3.1.2 Optimisation des propriétés de l'enrobé en couche de resurfaçage

Les enrobés utilisés en couche de resurfaçage sont plus ou moins sensibles à la fissuration. Les fissures se propageront d'autant plus difficilement dans l'enrobé de

resurfaçage, qu'il sera capable d'accepter de grandes déformations avant rupture, et ce, particulièrement par de basses températures. Il est possible d'aller dans ce sens en utilisant des bitumes pas trop visqueux et peu sensibles aux variations de température, en augmentant les teneurs en bitume et en réduisant la dimension des granulats. Les possibilités d'agir dans ce domaine, en utilisant des bitumes classiques, sont cependant limitées, car augmenter les possibilités de déformation avant rupture d'un matériau bitumineux se fait souvent au détriment d'autres caractéristiques telles que la résistance aux déformations permanentes sous trafic ou aux qualités antidérapantes. L'ajout de polymères peut constituer une solution envisageable permettant de résoudre le problème de la remontée de certains types de fissures (Colombier, 1988).

1.3.1.3 Interposition d'un produit ou d'un complexe entre la couche fissurée et la couche de resurfaçage

L'interposition d'un produit ou d'un complexe entre la couche fissurée et la couche de resurfaçage consiste à faire un découplage et à introduire un produit ou un complexe qui les désolidarise.

Les techniques d'interposition plus connues sous le nom de système anti-remonté de fissures consistent à mettre en oeuvre entre le substrat et la couche de resurfaçage, une membrane anti-fissure ou une couche de diffusion des contraintes qui a un triple but (Lefort et coll., 1999) :

- Sur le plan de la transmission des contraintes, en tête de la fissure, provenant des cycles thermiques lents, elle dissocie les deux couches
- Elle permet à la structure de supporter les sollicitations des charges en assurant un bon collage de l'enrobé à son support
- Elle doit conserver l'imperméabilité de la structure même si la fissure se développe dans la couche de resurfaçage.

Le découplage total : - le découplage total de la couche fissurée et de la couche de resurfaçage consiste à introduire entre les 2 couches un produit qui les désolidarise totalement. Par exemple, du sable en couche très mince, un papier kraft, un géotextile non collé à une des couches peuvent être employés à cet usage (Goacolou, 1982). Dans ce cas, les contraintes issues de la couche fissurée, liées au retrait thermique ou hydrique notamment, ne peuvent pas se transmettre à la couche de resurfaçage. Par contre, les contraintes induites par le trafic se transmettront au moins partiellement à la couche fissurée, à travers la couche de resurfaçage même si les deux couches ne sont pas collées.

Le découplage total demeure très efficace vis-à-vis des phénomènes de retrait (thermique et hydrique) mais applicable que pour des structures de chaussées très faiblement circulées (Goacolou, 1982). Pour les chaussées bitumineuses cette solution ne pourra conduire qu'à une fissuration du resurfaçage par fatigue. En effet, étant donné que le resurfaçage est désolidarisé du substrat (de la couche fissurée), le resurfaçage est donc sollicité en flexion de sorte qu'en bas de couche on observe des amplitudes de déformation importantes qui conduisent à une rupture à jeune âge par fatigue du resurfaçage.

Le découplage partiel : - le découplage partiel de la couche fissurée et de la couche de resurfaçage consiste à introduire un matériau ou un complexe pour assurer un découplage partiel entre les deux couches, vis-à-vis de la sollicitation lente, (mouvement horizontal : associé aux effets thermiques) tout en maintenant une liaison suffisante pour résister aux sollicitations rapides induites par le trafic. La plupart des solutions proposées actuellement pour ralentir ou empêcher la remontée des fissures font appel à ce principe.

Colombier (1991), a décrit le principe de découplage partiel en trois étapes (Figure 14) :

- La fissure existante se transforme, dans le matériau intermédiaire, en de multiples microfissures (Figure 14 – 1). La phase d'initialisation de la fissure à la base du resurfaçage sera alors plus longue
- Le matériau intermédiaire se déforme sans se rompre sous l'effet du mouvement de la fissure (Figure 14 – 2). La période d'amorçage de la fissure dans la couche de resurfaçage sera alors très longue
- La fissure se propage dans le matériau intermédiaire ou à son interface selon un trajet plus long (Figure 14 – 3).

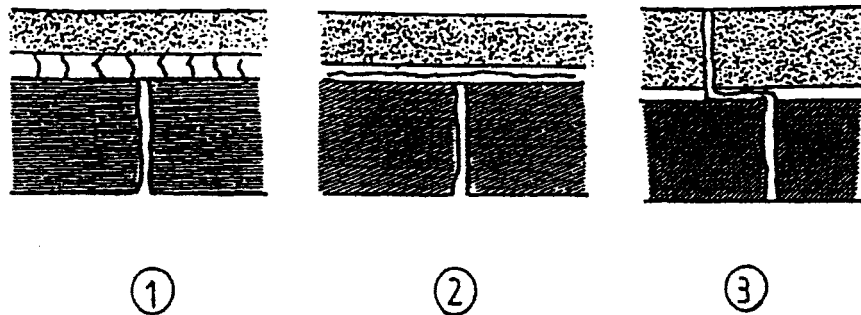


Figure 14 Principes du découplage partiel

1.3.2 Modification des caractéristiques de la couche de resurfaçage par «renforts» avec des additifs de structure

Sous l'appellation d'additifs de structure, on peut inclure tous les systèmes et procédés d'armatures, de grilles métalliques ou matériaux de synthèse. L'apport de tels produits dans la maîtrise de la remontée des fissures de chaussées peut se justifier si la résistance du matériau bitumineux est améliorée par l'armature ou si sa déformabilité avant rupture est augmentée par la présence de l'armature.